

УДК 621.923

И. Н. Пыжов, д-р техн. наук, Харьков, Украина

## **ОСОБЕННОСТИ САМОЗАТАЧИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА ОРГАНИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПСТМ**

*Розглянуто питання, пов'язані з особливостями процесу самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках. Висловлено і доведено припущення про те, що контакт двох практично рівно твердих матеріалів повинен обумовлювати особливості механізму самозаточування алмазоносного шару круга. Вперше експериментально встановлена і пояснена фізична природа такого явища як періодичність процесу самозаточування алмазоносного шару круга. Показано визначальну роль силового фактора в цьому процесі. Висловлено припущення, що періодичність самозаточування круга свідчить про наявність резерву для підвищення ефективності процесу шліфування.*

*Ключові слова: полікристалічні надтверді матеріали, алмазний круг, алмазоносний шар круга, ріжучий рельєф круга, органічна зв'язка, самозаточування круга, нормальна і тангенціальна складові сили різання, тиск в зоні контакту, ефективна потужність шліфування, періодичність процесу шліфування*

*Rассмотрены вопросы, связанные с особенностями процесса самозатачивания алмазных кругов на органических связках. Высказано и доказано предположение о том, что контакт двух практически равнотвердых материалов должен обуславливать особенности механизма самозатачивания алмазоносного слоя круга. Впервые экспериментально установлена и объяснена физическая природа такого явления как периодичность процесса самозатачивания алмазоносного слоя круга. Показана определяющая роль силового фактора в этом процессе. Высказано предположение, что периодичность самозатачивания круга свидетельствует о наличии резерва для повышения эффективности процесса шлифования.*

*Ключевые слова: поликристаллические сверхтвердые материалы, алмазный круг, алмазоносный слой круга, режущий рельеф круга, органическая связка, самозатачивание круга, нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, давление в зоне контакта, эффективная мощность шлифования, периодичность процесса шлифования*

*Questions related to the peculiarities of the process of self-sharpening of diamond wheels on organic bonds are considered. The assumption is made that the contact of two practically equally hard materials should determine the features of the self-sharpening mechanism of the diamond-bearing layer of the wheel. For the first time, the physical nature of such a phenomenon as the periodicity of the process of self-sharpening of the diamond-bearing layer of the wheel has been experimentally established and explained. The determining role of the force factor in this process is shown. It is suggested that the periodicity of self-sharpening of the wheel indicates the availability of a reserve to improve the efficiency of the grinding process.*

*Keywords: polycrystalline superhard materials, diamond wheel, diamond-bearing layer of the wheel, cutting wheel relief, organic bond, self-sharpening of the wheel, normal and tangential components of the cutting force, pressure in the contact zone, effective grinding power, periodicity of the grinding process*

**1. Постановка проблемы.** Уникальные физико-механические свойства поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) к которым в первую

очередь относятся синтетические поликристаллические алмазы (СПА) и плотные модификации нитрида бора (ПТНБ) позволили им сразу же найти возможность широкого использования во многих областях народного хозяйства. Отмеченные выше материалы составляют особую группу обрабатываемых материалов (ОМ). Технологии их производства постоянно совершенствуются [1], [2]. В тоже время существует серьезная проблема обработки ПСТМ. Затраты на изготовление инструментов из них достаточно велики, так как наука и техника пока не располагают абразивными материалами, твердость которых превышала бы твердость алмаза на необходимую с точки зрения эффективности процесса резания величину.

На настоящее время одним из наиболее распространенных методов формообразования изделий (в том числе и режущих инструментов) из ПСТМ является алмазное шлифование кругами на самозатачивающихся органических связках. Исследования показали, что удельных расход алмазов при использовании таких кругов достигает 15 карат на карат снятого СПА [3]. В условиях примерного равенства твердостей обрабатывающего (алмазных зерен круга) и обрабатываемого материалов (ПСТМ) классический механизм самозатачивания кругов не может реализоваться. Вследствие этого возникает необходимость постоянной правки рабочей поверхности кругов (РПК), например, абразивными брусками, что является существенным недостатком такого процесса обработки ПСТМ, поскольку приводит как к дополнительному нерациональному расходованию алмазных зерен, так и к образованию большого количества абразивного шлама, т.е. негативно отражается на культуре производства. Таким образом, отсутствие представлений об особенностях механизма самозатачивания алмазных кругов на органических связках не позволяет вскрыть их возможные потенциальные резервы при обработке ПСТМ. Представленная работа посвящена исследованию физических и технологических особенностей процесса обработки ПСТМ и выявлению на их основе механизма самозатачивания алмазоносного слоя круга. В конечном итоге это должно позволить установить пути повышения эффективности рассматриваемого процесса обработки.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** На сегодняшний день является доказанным, что в условиях, когда микротвердость обрабатываемого (ПСТМ) и обрабатывающего (алмазные зерна круга) материалов равны или сопоставимы, внедрение зерен в обрабатываемый материал практически отсутствует, а сьем припуска осуществляется за счет хрупкого микроразрушения ПСТМ [3]. А для этого необходимо, чтобы на алмазных зернах постоянно имелись острые микро – и субмикроромки.

В условиях высокосилового контактного взаимодействия с ПСТМ высота выступания алмазных зерен ( $H$ ) над уровнем связки резко снижается и одновременно с этим растет число зерен с площадками износа (рис. 1).

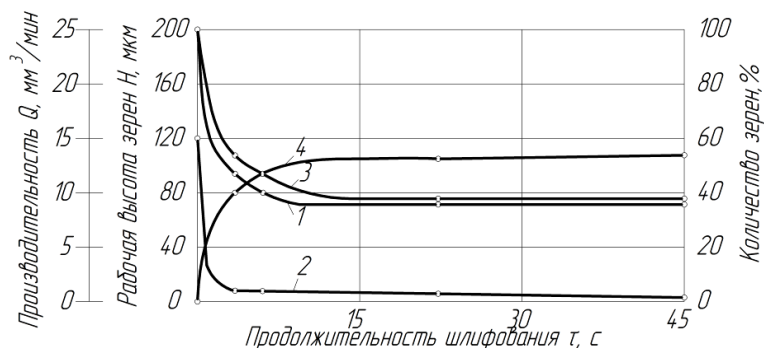


Рисунок 1 – Влияние времени шлифования СПА на изменение состояния РПК 1–H (Z-200/160); 2–Q; 3, 4–количество зерен острых (3) и с площадками износа (4).

Острые микро – и субмикроромки быстро исчезают, а площадки износа на зернах приобретают устойчивость (рис. 2).

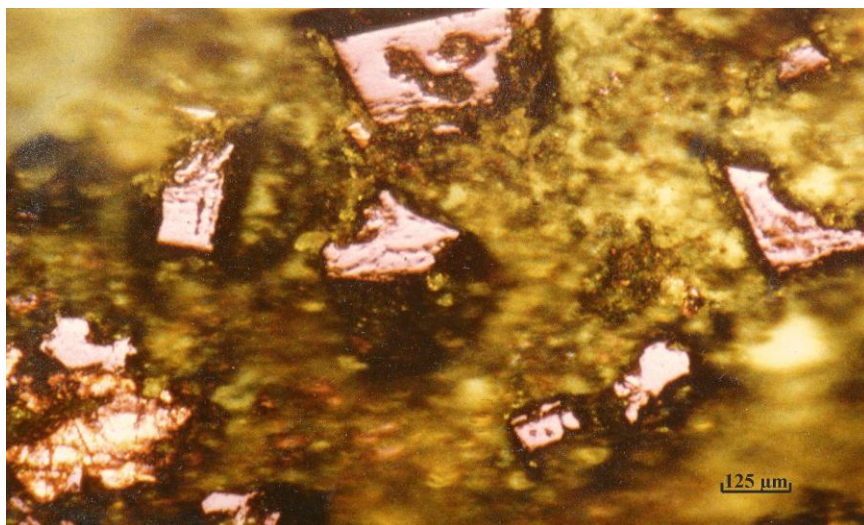


Рисунок 2 – РПК после 15 секунд шлифования СПА

В силу явления приспособляемости [4] процесс шлифования катастрофически быстро трансформируется в процесс трения

высокоизносостойкой пары «ПСТМ – алмазные зерна». Линейный съем припуска с ПСТМ практически прекращается. В результате этого производительность обработки ( $Q$ ) близка к нулю.

Для постоянного или периодического возобновления процесса формирования микро – и субмикромок на зернах круга необходимо создавать условия для их самозатачивания. Таким образом, в основе высокопроизводительной обработки ПСТМ в первую очередь лежит процесс самозатачивание алмазных зерен.

Несмотря на то, что шлифование является достаточно хорошо изученным процессом, многие его вопросы остаются и в настоящее время открытыми в силу сложности явлений, протекающих в зоне контакта круга с деталью. Это относится и к механизму самозатачивания кругов. Мнение исследователей на этот счет неоднозначное. Одни авторы считают, что самозатачивание происходит в основном за счет постепенного дробления зерен, другие утверждают обратное, что обновление режущей поверхности кругов главным образом осуществляется путем выпадения из связки целых зерен, третьи разделяют и то и другое мнение [4-9]. При этом процесс будет протекать стабильно лишь в том случае, если связка круга удаляется (в результате взаимодействия с продуктами диспергирования, а также выпадения отдельных зерен) со скоростью, равной интенсивности износа зерен.

Поскольку дробление зерен или их выпадение из связки происходит при определенных величинах действующих на них сил, можно считать силовую напряженность процесса шлифования одним из наиболее ответственных факторов, определяющих режим работы круга. В свою очередь уровень силовой напряженности во многом определяется условиями обработки, т. е. режимными параметрами и характеристикой круга (вид связки, марка зерен и др.).

Впервые на особую роль связки в условиях алмазного шлифования указал проф. М. Ф. Семко [10]. Использование в качестве абразива самого износостойкого и твердого в природе вещества – алмаза, а также других сверхтвердых материалов потребовало нового подхода к выбору связки круга. Благодаря этому появилась целая гамма различных связок, в том числе и металлических, обладающих такими важными свойствами, как повышенная степень алмазоудержания, высокая износостойкость, теплопроводность и др. [11].

Как известно, ПСТМ относятся к хрупким материалам и имеют твердость (49-100 ГПа) сопоставимую с твердостью алмазных зерен. Последнее обстоятельство исключает возможность внедрения зерен круга в ПСТМ и съем припуска с последнего осуществляется в основном путем хрупкого микроскалывания мельчайших частиц с его поверхности [3]. А это ведет к тому, что контакт обрабатываемого ПСТМ со связкой становится неизбежен.

Практическое отсутствие превышения твердости алмазных зерен круга над ОМ обуславливает интенсивность их износа, в сотни раз большую, чем при обработке традиционных материалов (твердые сплавы, керамики и т.д.). И вполне понятно, что в таких условиях связка круга не может удаляться естественным путем (за счет взаимодействия с продуктами диспергирования) с такой же скоростью. Тем более что при этом стружка, как таковая (в традиционном понимании), отсутствует. Поэтому к связке должны предъявляться особые требования, поскольку именно она становится ответственной за многие явления, протекающие в зоне шлифования [10], а, следовательно, и за уровень выходных показателей процесса шлифования.

Анализ литературных источников информации показал на отсутствие данных о механизме самозатачивания алмазных кругов на органических связках, что не позволяет в полной мере обеспечить эффективность процесса шлифования ПСТМ.

**3. Цель исследования.** Установление особенностей и закономерностей процесса самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ.

**4. Основные материалы исследования.** Анализ результатов исследований в рассматриваемой предметно области позволяет заключить, что при шлифовании ПСТМ механизм самозатачивания алмазных кругов, если такой процесс возможен вообще, должен иметь принципиальное отличие по сравнению с обработкой материалов обычной твердости. Этим и можно объяснить отсутствие в литературе единого мнения об эффективности применения алмазных кругов на органических, металлоорганических и металлических связках для обработки ПСТМ.

Это обстоятельство свидетельствует о необходимости проведения исследований, которые позволили бы установить физическую сущность процесса самозатачивания алмазных кругов при обработке особой группы высокотвердых ОМ, что может позволить предложить пути повышения эффективности процесса их шлифования.

В связи с этим были проведены экспериментальные исследования, направленные на формирование представлений о механизме самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ. Выполненные ранее исследования по обработке ПСТМ предварительно заправленным алмазным кругом на органической связке показали, что в случае шлифования с постоянным усилием прижатия образца к РПК («упругая» схема,  $P_n \approx 1$  МПа) режущий рельеф последнего быстро изнашивается (в течение 15-30 с) и съем припуска с ПСТМ полностью прекращается [3]. В то же время при шлифовании твердого сплава такой режим обеспечивает устойчивую работу в режиме самозатачивания круга [11]. Как показали наши исследования, такая картина не меняется и при более чем десятикратном увеличении давления в контакте. Так, например, при

шлифовании СПА в диапазоне давлений  $P_n=0-35$  МПа происходит трение пары «ПСТМ - алмазные зерна» без заметного износа ее элементов. Например, самозатачивание круга на связке В2-01 (связка на основе пудвербакелита, наполнитель – карбид бора [12]) начинается при  $P_n \approx 35$  МПа. Интенсивный рост силы  $P_z$  свидетельствует о съеме припуска с ПСТМ. Экспериментально установлено, при увеличении давления в контакте с 35 до 70 МПа производительность процесса возрастает практически с нуля до  $13,5 \text{ мм}^3/\text{мин}$ , удельный расход алмазов снижается со 100 до  $40 \text{ мг}/\text{мм}^3$ , сила резания  $P_z$  достигает значения 140 Н, что приводит к возрастанию коэффициента шлифования с 0 до 0,1. Несмотря на рост силы  $P_z$ , удельная энергоёмкость процесса резко снижается и при  $P_z=140$  Н составляет  $V=0,66 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{мм}^3$  (ее значение в зоне трения высокоизносостойкой пары «алмазные зерна круга - ПСТМ» превышает  $10 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{мм}^3$ ). Это можно объяснить интенсивным ростом производительности процесса. Приведенные данные свидетельствуют о том, что, процесс шлифования в режиме самозатачивания круга с точки зрения многих выходных показателей становится эффективным.

Высокое значение температуры в зоне шлифования  $T \approx 980$  К свидетельствует об активном участии связки круга в процессе обработки. Здесь следует отметить, что принципиально важным условием возможности нормального ведения процесса в этом случае является обильное охлаждение зоны шлифования. В противном случае в контакте ПСТМ с РПК развиваются очень высокие температуры ( $T \geq 1500$  К), что приводит к интенсивному выгоранию связки круга и повышению брака изделий. В таких условиях очень важно использовать эффективные способы подачи СОТС в зону шлифования.

Аналогичная картина наблюдается и в случае шлифования ПТНБ, однако контактные нагрузки при этом имеют значительно меньшие значения (съём припуска начинается при  $P_n \geq 15$  МПа). Это можно объяснить тем, что твердость алмазных зерен круга все-таки превышает твердость ОМ.

Исследование процесса обработки ПСТМ по «жесткой» схеме предварительно вскрытым кругом показало, что он протекает не стабильно, а характеризуется периодическими всплесками физических и технологических показателей обработки (рис. 3). При этом, как видно из рисунка, процесс шлифования можно разделить на две зоны: первая – зона врезания ( $\tau=0-250$  с) и вторая – зона установившегося периодического процесса ( $\tau > 250$  с). Если в первой зоне изменения показателей обработки носят случайный характер, имеют неодинаковый шаг и величину и зависят во многом от исходного состояния круга, то во второй зоне наблюдается их четкая повторяемость через определенный период времени (в данном случае  $\tau \approx 80$  с). Такая картина наблюдается на протяжении всего времени работы круга до его полного износа. Следовательно, этот результат можно рассматривать как

положительный ответ на вопрос о возможности самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ.

Высокие нагрузки в режиме самозатачивания круга вызывают значительную величину натяга в технологической системе. В связи с этим все эксперименты по шлифованию ПСТМ по «жесткой» схеме выполнялись таким образом, чтобы поликристалл выходил за пределы рабочей поверхности не более чем на 1/4 часть размера своего торца. Это позволяло исключить периодические удары ПСТМ о внутреннюю и наружную кромки торцового круга, а, следовательно, снизить вероятность их взаимного разрушения.

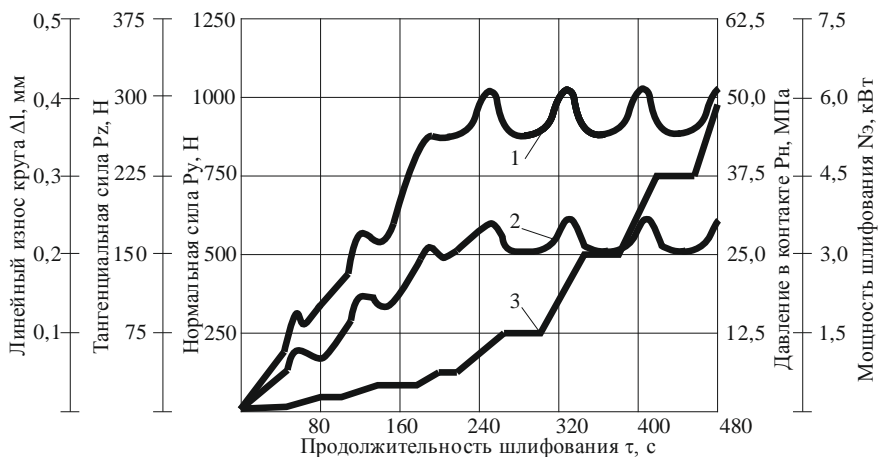


Рисунок 3 – Изменение выходных показателей обработки во времени  
1 –  $P_y$  ( $P_n$ ); 2 –  $P_z$  ( $N_n$ ); 3 –  $\Delta l$

Условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 B2-01 100%  
 $V_k=20$  м/с,  $S_{пр}=1$  м/мин, СОТС – 3%-й раствор  $Na_2CO_3$  в воде  
 Обрабатываемый материал – СПА марки АСБ [3]  $Sk \approx 20$  мм<sup>2</sup>)

Анализ РПК после шлифования ПСТМ показал, что физическая природа наблюдаемых при этом всплесков связана с локальным характером самозатачивания зерен алмазного круга, что является особенностью процесса обработки.

Одной из возможных причин разрушения зерен, на первый взгляд, должна быть сила  $P_y$ , величина которой может достигнуть такого значения, когда будет превзойден предел прочности алмазных зерен на сжатие. Однако расчеты показывают, что этого не происходит. Так, например, для условий, представленных на рис. 3, максимальная величина силы  $P_y$  равна 1060 Н,

а статическая допустимая разрушающая нагрузка для зерен марки АС6 зернистостью, например 80/63, составляет [Рсж.] $\approx$ 4,2 Н.

Оптические исследования режущего рельефа круга на участке установившейся периодичности показали, что в контакте с ПСТМ находится 50-80% зерен от их максимально возможного количества. Практически все зерна, находящиеся на РПК в пределах площади контакта  $S_k$  с ПСТМ (за исключением выпавших), контактируют с ПСТМ, что является очень важной особенностью рассматриваемого процесса.

Теоретически разрушение зерен произойдет в том случае, если будет соблюдаться условие:

$$P_{сж.} = \frac{P_y}{n_z} \geq [P_{сж.}], \quad (1)$$

где  $P_{сж.}$  – нагрузка, действующая на одно зерно, Н;  $P_y$  – нормальная составляющая силы резания, Н;  $n_z$  – количество зерен в контакте с ПСТМ, шт.

В нашем случае для поликристалла СКМ ( $S_k=20 \text{ мм}^2$ ) расчетное число зерен в контакте составляет 1000 шт.

Тогда на основании выражения (1) имеем:

$$P_{сж.} = \frac{1060}{0,5 \cdot 1000} = 2,1 < [4, 2].$$

Следовательно, даже при учете того, что в контакте с ПСТМ находится половина возможного числа зерен, максимальная нагрузка, действующая на них, в 2 раза меньше, чем необходимая для разрушения. А если учесть тот факт, что прочностные свойства связки позволяют зернам вдавливаться в нее, можно с определенной уверенностью исключить возможность массового разрушения зерен под воздействием нормальной нагрузки.

На такую возможность указывают данные исследований, выполненных под руководством проф. И. П. Третьякова. Они показали, что сила Рсж., необходимая для разрушения зерна в условиях, более близких к реальному процессу, во многом зависит от материала связки и глубины его залегания в ней [13]. С увеличением пластичности связки и глубины залегания зерен она возрастает и может в 1,5-3 раза превышать величину силы Рсж. полученную при стандартных статических испытаниях зерен на прочность при одноосном сжатии по ГОСТ 9206-70. В условиях шлифования по жесткой схеме, когда в контакте пары «алмазные зерна – ПСТМ» находятся чрезвычайно жесткие материалы, часть поперечной подачи должна как бы компенсироваться упругостью связки и величиной заглубления в нее алмазных зерен. С определенными допущениями процесс алмазного шлифования можно сравнить с процессом профилирования алмазных кругов методом пластического деформирования [4], [14], где в качестве притира выступает



предельно жесткий материал (ПСТМ), а шаржируемый материал – металлическая связка (на основе алюминия, бронзы, железа или кобальта). При этом, как показали работы, выполненные в научной школе П. И. Ящерицына, даже алмазные зерна относительно небольших размеров и прочности (например, марки АС6 зернистостью 63/40) могут быть полностью вдавлены даже в металлическую связку круга без их разрушения [14].

Это дает основание утверждать, что под действием высоких нормальных нагрузок происходит вдавливание зерен в органическую связку круга, которая имеет значительно меньшую твердость, чем обрабатываемый поликристалл. Вполне естественно предположить, что при этом локально будет увеличиваться концентрация алмазных зерен в зоне контакта РПК с ПСТМ. Это является еще одной важной особенностью рассматриваемого процесса.

Анализируя данные, представленные на рис. 3, процесс самозатачивания предварительно вскрытого круга при работе по «жесткой» схеме можно представить следующим образом. В начальный момент, когда зерна предварительно вскрытого круга значительно выступают над уровнем связки и имеют острые микро- и субмикромки, происходит сьем ПСТМ и износ (самозатачивание) зерен при относительно малых значениях составляющих силы резания ( $\tau \leq 30$  с,  $P_y = 225$  Н,  $P_z = 20$  Н). По мере уменьшения высоты зерен растет их число в контакте и величина образующихся на них площадок износа. Поэтому процесс съема ПСТМ и износа круга затухает, что ведет к быстрому росту нормальной составляющей силы резания  $P_y$ , а следовательно, давления в контакте  $P_n$  и силы трения, вызывающей рост тангенциальной составляющей силы  $P_z$ . При достижении силой  $P_y$  определенной величины может произойти вдавливание зерен в связку без их заметного разрушения. Как только это произойдет с зернами круга, находящимися в контакте с обрабатываемым ПСТМ, зерна, входящие в контакт (их вершины выступают над вершинами зерен, находящихся в контакте), будут работать одновременно на сжатие и изгиб. Поскольку предел их прочности на изгиб примерно на порядок меньше, чем на сжатие, то при высокоскоростном контактном взаимодействии зерен с обрабатываемым ПСТМ начнется процесс их интенсивного микроразрушения (самозатачивания) с образованием острых микро- и субмикромрок. В результате происходит всплеск силы  $P_z$ , что свидетельствует о возобновлении съема припуска с ПСТМ. Как видно из рисунка 3, всплеск выходных показателей обработки имеет некоторую продолжительность во времени ( $\tau \approx 5-40$  с). Этому способствует, по-видимому, три основных фактора: первый заключается в том, что начавшийся мгновенно процесс самозатачивания зерен в силу своей динамичности может продолжаться и при величине усилия  $P_y$ , несколько меньшей, чем та, при которой он начался; второй состоит в том, что после вдавливания зерен в связку и выхода их из контакта с ПСТМ происходит

увеличение высоты выступления зерен на некоторую величину из-за упругого восстановления связки. В результате этого зерна будут входить в контакт с ударом и воспринимать изгибающие нагрузки; в-третьих, предполагается, что за время всплеска происходит дополнительное вдавливание зерен в связку за счет осуществления подачи образца на круг механизмом поперечной подачи станка, что также способствует интенсификации процесса самозатачивания зерен.

Так как суммарная величина линейного съема ПСТМ и износа круга за время всплеска превышает величину подачи на круг за это же время механизмом поперечной подачи, то сила  $P_y$  несколько падает из-за уменьшения натяга в технологической системе. Это приводит к прекращению процесса вдавливания зерен в связку, а, следовательно, их самозатачивания. В результате этого сила  $P_y$  вновь начинает расти. Однако, поскольку с уменьшением высоты выступления зерен (по мере их износа) над уровнем связки круга увеличивается их количество в контакте с ПСТМ в силу разновысотности зерен, то очередное вдавливание зерен в связку произойдет уже при большем значении силы  $P_y$ . Этому способствует также тот факт, что по мере вдавливания зерен в связку происходит увеличение концентрации алмазов в круге в сравнении с исходным значением, что само по себе делает алмазоносный слой жестче и затрудняет процесс вдавливания. Поэтому следующее вдавливание произойдет при еще большем значении силы  $P_y$  и т.д. До наступления установившейся периодичности процесса износа круга таких всплесков (местного значения) может быть несколько. Например, для условий, представленных на рис. 3 их три.

Рост составляющих сил резания прекращается по достижении своего максимального для данных условий значения ( $P_y=1060$  Н,  $P_z=160$  Н,  $\tau=250$  с), после того, как в контакт с ПСТМ войдет связка. В этом случае периодичность всех параметров (износ круга, съем ПСТМ, силы резания и др.) устанавливается, т.е. происходят чередующиеся через определенный период времени (в конкретном случае  $\tau \approx 80$  с) периодические всплески и затухания значений выходных показателей обработки. В это время периодичность процесса обусловлена в основном только тем, что суммарная величина съема ПСТМ и износа круга в момент самозатачивания последнего превышает величину подачи образца на круг, в результате чего происходит уменьшение натяга в технологической системе, а, следовательно, и нормальной силы резания ( $P_{y.min} \approx 875$  Н), что, в свою очередь, приводит к прекращению процесса самозатачивания зерен, а следовательно, съема ПСТМ. Этот процесс возобновляется при достижении нормальной силой своего максимального для данных условий значения ( $P_{y.max}=1060$  Н,  $P_{z.max}=60$  Н), когда ОМ вновь внедряется в связку, одновременно вдавливая в нее зерна, которые снова начинают работать на изгиб, и т.д. Учитывая высокую интенсивность износа круга ( $\geq 200$  мкм/мин), можно предположить,

что обрабатываемый ПСТМ в момент внедрения в алмазonoсный слой является как бы резцом по отношению к кругу, удаляя с его рабочей поверхности зерна и связку, способствуя, таким образом, его самозатачиванию.

Минимальные значения сил  $P_y$  и  $P_z$  в значительной степени зависят от величины поперечной подачи, компенсирующей уменьшение натяга в технологической системе. Специальные эксперименты, проведенные с выключением поперечной подачи в момент начала самозатачивания круга, показали, что в таких условиях сила еще несколько снижается, после чего происходит ее стабилизация (рис. 4).

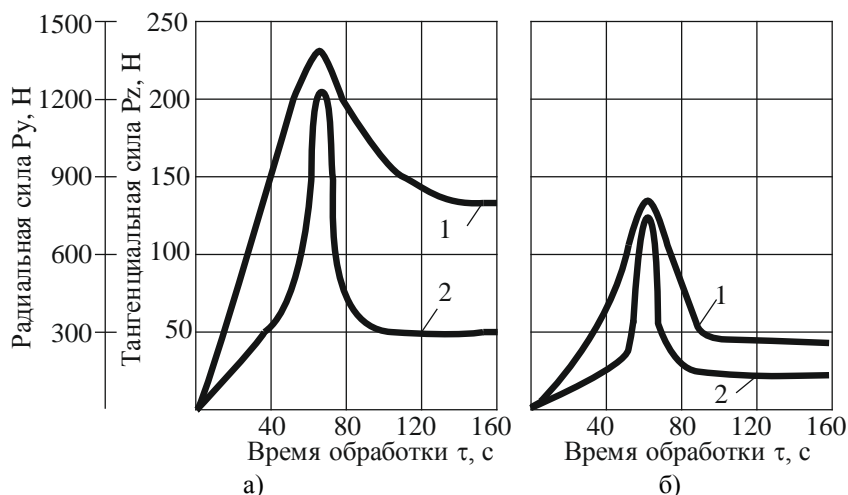


Рисунок 4 – Осциллограммы, отражающие влияние марки ПСТМ и времени обработки на составляющие силы резания  $P_z$  (1) и  $P_y$  (2)  
а) - СПА; б) - ПТНБ

Условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 Б156 100%  
 $V_k=20$  м/с,  $S_{пр}=1$  м/мин, СОТС–3% - й раствор  $Na_2CO_3$  в воде

Прекращение дальнейшего снижения силы  $P_y$  на достаточно высоком уровне ( $P_y \approx 300$  Н для СПА марки СКМ-Р (а) и  $P_y \approx 100$  Н для ПТНБ гексанит-Р (б), а также значительное снижение силы  $P_z$ , которая вызвана в этих условиях в основном силой трения пары «ПСТМ - алмазные зерна», свидетельствуют о быстром прекращении процессов съема припуска с ОМ и износа круга. Отметим, что значительная разница пиковых (максимальных) значений сил  $P_y$  и  $P_z$  для ОМ на основе СПА и ПТНБ вызвана не только их различной твердостью, но и неодинаковыми значениями площадей контакта с кругом (по причине неодинаковых диаметров заготовок).

Наличие контакта СПА со связкой подтверждается электронномикроскопическими исследованиями состояния РПК как после шлифования ПСТМ в условиях стабильной периодичности изменения физических и технологических показателей, так и после останова вращения круга с одновременным выключением поперечной подачи в момент самозатачивания.

В последнем случае установлено, что уровень связки, находящейся под поликристаллом, ниже уровня связки, еще не вошедшей в контакт с ним, примерно на величину 4-10 мкм. Установлено также, что режущий рельеф круга характеризуется высокой степенью сглаженности, незначительная высота выступания зерен над уровнем связки  $H = 3-8$  мкм обусловлена, по-видимому, только лишь упругим восстановлением связки.

Имеется значительное количество лунок от выпавших зерен ( $\approx 20-50\%$ ). Анализ характера износа зерен показывает, что подавляющая их часть имеет поверхность, образованную в результате разрушения с последующим интенсивным ее выглаживанием в результате высокосилового и высокотемпературного взаимодействия с поверхностью ОМ. Отсутствие на большинстве зерен ( $\approx 75\%$ ) макро- и микротрещин может служить, по-видимому, подтверждением тому, что основной причиной их самозатачивания является тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$ .

Считается [3], что алмазное шлифование ПСТМ кругами на металлических связках неэффективно из-за невозможности самозатачивания. Однако анализ полученных выше данных позволяет предположить, что самозатачивание крута на металлической связке возможно, но должно отличаться уровнем силовой напряженности процесса. Это связано с такими показателями свойств связок, как прочность и повышенная способность алмазоудержания. В результате этого увеличивается сопротивление вдавливанию зерен. Этому могут способствовать такие факторы как рост количества алмазных зерен в контакте с ПСТМ (за счет уменьшения числа выпавших зерен), а также склонность металлических связок к наклепу. Электронномикроскопические исследования показали, что наблюдаемая периодичность изменения выходных показателей процесса шлифования кругами на металлических связках имеет такую же природу, как и в случае использования кругов на органических связках. Однако реализуется она при больших значениях давления в контакте, величина которого может достигать 60 МПа и более. Повышенная прочность связок сказывается и на тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ , а, следовательно, и мощности шлифования. Ее эффективное значение может составлять 6 кВт и более.

**Выводы и перспективы развития.** На основании изложенного выше можно заключить, что алмазные круги на органических связках могут успешно осуществлять шлифование ПСТМ в режиме самозатачивания без

дополнительной правки до полного износа алмазоносного слоя. Однако такой процесс является высокосиловым. Механизм самозатачивания алмазоносного слоя круга предопределяется вдавливанием ПСТМ в связку, в результате чего алмазные зерна начинают испытывать значительные по величине изгибающие и растягивающие нагрузки. Учитывая, что предел прочности алмаза на изгиб и растяжение на порядок меньше, чем на сжатие, это обуславливает интенсивное самозатачивание алмазных зерен с образованием на них острых микро- и субмикроромок. Это и обеспечивает резкую интенсификацию съема припуска с ПСТМ. Процесс самозатачивания РПК происходит периодически, затухая и возобновляясь вновь, что свидетельствует о наличии резерва для повышения эффективности процесса шлифования. Алмазные круги на металлических связках также могут работать в режиме самозатачивания, однако силовая напряженность процесса еще более велика.

В дальнейшем представляет определенный интерес вопрос практической реализации потенциальных резервов процесса шлифования ПСТМ на базе выявленного механизма самозатачивания алмазных кругов на органических связках.

**Список использованных источников:** 1. Новиков Н. В. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. – К.: Наук. думка, 1993. – 220 с. 2. Пыжов И. Н. Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / И. Н. Пыжов, А. В. Васильев, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2011. – Вып.80. – С. 226-235. 3. Семко М. Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Г. Ходоревский. – Харьков: Вища школа, 1980. – 192 с. 4. Грабченко А. И. 3D процессы алмазно-абразивной обработки. Монография / А. И. Грабченко, В. А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 345 с. 5. Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб [и др.] – Киев: Техника, 1978. – 192 с. 6. Мишинаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов / Мишинаевский Л. Л. – Киев: Наук, думка, 1982. – 192 с. 7. О механизме износа алмазных кругов / С. А. Попов, Г. К. Грановский, Н. П. Малевский [и др.] // Алмазы. – 1970. – Вып. 2. – С. 17-22. 8. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. 9. Сагарда А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишинаевский – Киев: Техніка, 1974. – 180 с. 10. Семко М. Ф. Влияние связки на работу алмазных кругов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Д. Узуян // Машиностроение. – 1965. – № 5. – С.8-10. 11. Синьковский Л. К. Методика оценки режущих свойств алмазных шлифовальных кругов / Л. К. Синьковский, Н. Э. Шишков, Р. В. Симонян // Сб. тр. ВНИИалмаза: Повышение работоспособности алмазного инструмента. – М.: НИИмаш, 1980. – С. 25-28. 12. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки / И. П. Захаренко – Киев: Техника, 1980. – 215 с. 13. Третьяков И. П. Устройство для определения механической прочности алмазно-абразивных зерен / И. П. Третьяков, Р. А. Абидов // Алмазы. – 1968. – Вып. 3. – С. 10-12. 14. Яцерицын П. И. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием / П. И. Яцерицын, В. Д. Дорофеев, Г. Н. Гринин. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1982. – 112 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Novikov N.V., Majstrenko A.L., Kulakovskij V.N. Soprotivlenie razrusheniju sverhtverdyh kompozicionnyh materialov – K.: Nauk. dumka, 1993. – 220 s. 2. Pyzhov I.N., Vasil'ev A.V., Klimenko V.G. Sostojanie voprosa i perspektivy primenenija almazov,

poluchennyh metodom CVD / Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2011. – Vyp.80. – S. 226-235. 3. Semko M.F., Grabchenko A.I., Hodorevskij M.G. Almaznoe shlifovanie sinteticheskikh sverhtverdyh materialov. – Har'kov: Vishha shkola, 1980. – 192 s. 4. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A. 3D processy almazno-abrazivnoj obrabotki. Monografija. – Har'kov: NTU «HPI», 2008. – 345 s. 5. Osnovy almaznogo shlifovaniya / M.F. Semko, A.I. Grabchenko, A.F. Rab [i dr.] – Kiev: Tehnika, 1978. – 192 s. [6]. Mishnaevskij L. L. Iznos shlifoval'nyh krugov. – Kiev: Nauk, dumka, 1982. – 192 s. 7. O mehanizme iznosa almaznyh krugov / S. A. Popov, G. K. Granovskij, N. P. Malevskij [i dr.] / Almazy. – 1970. – Vyp. 2. – S. 17–22. 8. Popov S.A., Malevskij N.P., Tereshhenko L.M. Almazno-abrazivnaya obrabotka metallov i tverdyh splavov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 263 s. 9. Sagarda A.A., Chepoveckij I.H., Mishnaevskij L.L. Almazno-abrazivnaya obrabotka detalej mashin – Kiev: Tehnika, 1974. – 180 s. 10. Semko M.F., Grabchenko A.I., Uzunjan M.D. Vliyanie svyazki na rabotu almaznyh krugov / Mashinostroenie. – 1965. – № 5. – S.8–10. 11. Sin'kovskij L.K., Shishkov N.Je., Simonjan R.V. Metodika ocenki rezhushhih svoystv almaznyh shlifoval'nyh krugov / Sb. tr. VNIImazma: Povyshenie rabotosposobnosti almaznogo instrumenta. – M.: NIImash, 1980. – S. 25-28. 12. Zaharenko I. P. Almaznye instrumenty i processy obrabotki. – Kiev: Tehnika, 1980. – 215 s. 13. Tret'jakov I.P., Abidov P.A. Ustrojstvo dlja opredeleniya mehanicheskoy prochnosti almazno-abrazivnyh zeren / Almazy. – 1968. – Vyp. 3. –S. 10-12. 14. Jashhericyn P.I., Dorofeev V.D., Grinin G.N. Profilirovanie almazno-abrazivnyh instrumentov plasticheskim deformirovaniem. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1982. – 112 s.